



Acceleration et analyse de fragments d'ADN a l'aide d'un spectrometre de masse

G. Hadinger

► To cite this version:

G. Hadinger. Acceleration et analyse de fragments d'ADN a l'aide d'un spectrometre de masse. 2000, pp.20. in2p3-00009748

HAL Id: in2p3-00009748

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00009748>

Submitted on 7 Jul 2000

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Accélération et analyse de fragments d'ADN

à l'aide d'un spectromètre de masse.

G. Hadinger

1 Généralités et contraintes du projet

Le projet [Ref. 1] prévoit d'accélérer des fragments d'ADN, de les trier suivant leur masse et de les envoyer sur un faisceau croisé de protons à une énergie de $E = 200 \text{ keV}$. L'interaction de ces deux faisceaux permettrait d'étudier les changements chimiques des molécules organiques.

Les faibles moyens financiers à disposition au début de l'expérience nous orientent vers l'utilisation d'un matériel de récupération.

Le manque de place pour l'installation de l'appareillage — il va se situer dans une pièce au sous-sol du Van de Graaf 2,5 MeV — impose une réduction extrême de ses dimensions.

Nous avons choisi comme type de spectromètre, celui qui réunit un déflecteur électrique et un électro-aimant. En les combinant astucieusement, nous pouvons focaliser le faisceau du plan objet sur le plan image et sélectionner une masse particulière indépendamment — au premier ordre — des fluctuations de son énergie.

La source fournissant les fragments d'ADN impose une extraction verticale. Ceci entraîne de placer l'entrée du déflecteur électrique verticalement avec, comme conséquence, une analyse en énergie dans le plan vertical. Pour croiser proprement le faisceau de protons nous mettons le plan médian de l'aimant à la hauteur du faisceau de protons. Ceci nous conduit à analyser le moment cinétique dans le plan horizontal. Nous avons prévu de placer une section optique à la suite du déflecteur électrique dans le but d'amener la direction verticale de la dispersion du déviateur électrique dans la direction horizontale de la dispersion de l'aimant.

2 Conditions optiques et calcul du spectromètre

— 1^{ère} condition

Il faut une liaison objet-image entre l'entrée et la sortie de l'appareil.

— 2^{ème} condition

Il faut regrouper les mêmes masses au premier ordre, indépendamment d'une faible variation de leur énergie, au même emplacement dans le plan de l'image à la sortie. Cette condition implique la relation suivante [Ref. 2] :

$$2R_e + \frac{R_m}{G_m} = 0 \quad (1)$$

où R_e est le terme de la dispersion dans la matrice de transfert objet-image pour la partie du déflecteur électrique, et R_m celui pour la partie magnétique. G_m est le terme de grandissement de la matrice de transfert de la section magnétique.

Nous utilisons pour le calcul de l'optique de la ligne le programme TRANSPORT [Ref. 2]. Ce programme nous fournit au premier ordre les matrices de transfert 6 x 6. Pour pouvoir interpréter les résultats de ces calculs, nous traduisons la relation (1) dans la terminologie de TRANSPORT, c'est-à-dire en fonction des éléments des matrices de transfert électrique R_{16e} et magnétique R_{16m} et R_{11m} :

$$2R_{16e} + \frac{R_{16m}}{R_{11m}} = 0 \quad (2)$$

Le programme graphique TRAGRA [Ref. 3] couplé avec TRANSPORT permet de tracer les courbes des enveloppes du faisceau. Nous les utilisons amplement.

Nous avons découpé la ligne du faisceau en 3 sections. La section I contient le déflecteur électrique. La section II contient le système qui change la direction de la dispersion en énergie. La section III, enfin, contient le système d'analyse en masses du faisceau. Nous discuterons, successivement, les résultats de chaque section et du spectromètre en entier. Nous commençons les calculs par la dernière section en remontant vers l'entrée. En effet, nous devons en premier lieu optimiser le rapport $\frac{R_m}{G_m}$, soit $\frac{R_{16m}}{R_{11m}}$, qui est le seul terme à deux paramètres. Une fois qu'une solution est trouvée, nous continuons les calculs par la section II puis la section I.

3 Aimant d'analyse : section III

Un aimant est nécessaire pour séparer les différentes masses du faisceau. Nous avons trouvé un aimant de récupération d'angle de déviation $\theta = 60^\circ$ et de rayon $r_m = 0,374$ m. Ses pôles sont parallèles et les parties entrée et sortie sont circulaires. Nous avons choisi le mode optique symétrique (bras d'entrée et de sortie de même longueur). Un quadrupôle à l'entrée (1qy2) et un autre à la sortie (2qy2) assurent la focalisation verticale du faisceau.

Dans la matrice de transfert 6 x 6 correspondante du programme TRANSPORT, les termes $R_{12m} = 0$ et $R_{34m} = 0$ signifient qu'il existe une relation objet-image dans les plans x et y. Les termes R_{11m} et R_{33m} donnent, respectivement, la valeur du grandissement en x et y entre le

début et la fin de cette section. Les termes R_{21m} et R_{43m} donnent les inverses des longueurs focales de l'ensemble en x et en y, respectivement.

Nous présentons un exemple de solution pour un faisceau de dimensions initiales $X_o = Y_o = 0,1$ mm et $X'_o = Y'_o = 15,0$ mrad. Cette solution correspond à une dispersion $R_{16m} = 15,24$ mm/%. Les grandissements horizontal et vertical sont égaux $R_{11m} = R_{33m} = -1,00$. La table (Tab. 3. 1) donne la matrice de transfert. La figure (fig. 3. 1) montre la trace des enveloppes du faisceau.

- 1,00011	- 0,00001	0,00000	0,00000	0,00000	15,24431
- 1,95696	- 0,99991	0,00000	0,00000	0,00000	14,91540
0,00000	0,00000	- 1,00007	- 0,00006	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	- 0,90944	- 0,99998	0,00000	0,00000
- 0,14915	- 0,15243	0,00000	0,00000	1,00000	2,35854
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000

Table. 3. 1

4 Changement de la direction de la dispersion en énergie : section II

Cet élément intermédiaire placé entre les sections I et III est nécessaire pour que la direction verticale de la dispersion en énergie se retrouve suivant la direction horizontale de la dispersion en moment cinétique. Parmi les différents moyens possibles pour obtenir ce résultat, nous avons choisi celui qui est constitué d'une ligne de faisceau comprenant 5 quadrupôles régulièrement espacés et tournés de 45° autour de l'axe Z de la direction du faisceau [Ref. 4]. Par raison de symétrie les quadrupôles 1qx1 et 5qx1, ($n^\circ 1$ et 5), sont portés à la même tension électrique. Il en est de même pour les quadrupôles 2qy1 et 4qy1, ($n^\circ 2$ et 4). Seul le quadrupôle 3qx1, ($n^\circ 3$), situé au centre a une tension indépendante. En tout 3 alimentations électriques seront nécessaires. Cette disposition nous laisse le choix d'orienter la déviation de l'aimant vers la droite ou bien vers la gauche. Il suffit pour cela de changer la polarité des 5 quadrupôles. Nous proposons une illustration géométrique du fonctionnement, voir (fig. 4. 1). Beaucoup de soins ont été pris pendant les calculs pour réduire au maximum la longueur de cette ligne.

Les figures (4. 2) et (4. 3) montrent les courbes des enveloppes du faisceau pour 2 modes de fonctionnement qui diffèrent l'un de l'autre par une inversion des tensions des quadrupôles.

Les 2 matrices de transfert correspondantes sont données (Tab. 4. 1 et Tab. 4. 2). Le changement de la direction de la dispersion implique un réarrangement des sous-matrices dans ces matrices de transfert. Leurs colonnes (1) et (2) s'échangent avec les colonnes (3) et (4), respectivement. Dans la colonne (6), les lignes (1) et (2) s'échangent avec les lignes (3) et

(4), respectivement. Ainsi par exemple, dans la formule (2) le grandissement R_{11} devient le terme R_{13} . Les valeurs des termes communs de ces matrices sont $R_{13} = R_{24} = R_{31} = R_{42} = \pm 1,0$ et $R_{14} = R_{32} = 0,0$. Nous avons une lentille mince focalisante pour le mode $R_{23} = R_{41} < 0$ (Tab 4. 1) et une lentille mince défocalisante pour le mode $R_{23} = R_{41} > 0$ (Tab. 4. 2). Le faisceau garde les mêmes conditions optiques à la sortie qu'à l'entrée de cette section et la longueur de la ligne reste inchangée.

0,00000	0,00000	- 1,00002	0,00003	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	- 4,36290	- 0,99984	0,00000	0,00000
- 1,00002	0,00003	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
- 4,36290	- 0,99984	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000	1,37758
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000

Table. 4. 1

0,00000	0,00000	1,00002	- 0,00003	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	4,36290	0,99984	0,00000	0,00000
1,00002	- 0,00003	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
4,36290	0,99984	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000	1,37758
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000

Table. 4. 2

5 Déflecteur électrique : section I

Ce déflecteur électrique est l'élément qui permet l'analyse en énergie des particules du faisceau. Nous avons trouvé un déflecteur sphérique de récupération à l'ISN de Grenoble. Son rayon est $= 0,500$ m, son angle de déviation $= 90^\circ$ et la distance libre entre les électrodes est $d = 40,0$ mm. La longueur déroulée est $L_e = 0,785$ m. Le programme TRANSPORT ne permet pas d'introduire un déflecteur électrique comme tel. Nous devons insérer sa matrice de transfert [Ref. 5]. De ce fait, le programme de sortie graphique ne transmet que les longueurs d'entrée et de sortie du déflecteur de la première section.

Nous avons fait une tentative de calcul en mode symétrique : la distance objet-déflecteur est égale à la distance déflecteur-image, $L_o = L_i = 0,500$ m. Il s'en est suivi une dispersion en énergie $R_{el} = R_{36e} = - 10,0$ mm/%, voir figure (5. 1).

Pour la solution choisie, la deuxième condition (formule (2)) entraîne une dispersion en énergie égale à $R_{36e} = - 15,24 / 2 = - 7,64$ mm/%. Pour cette valeur imposée le programme TRANSPORT permet de trouver la géométrie correspondante de la section I, voir la matrice

de transfert dans la table (Tab. 5. 1). Les valeurs du grandissement d'image horizontal et vertical sont égales, $R_{11e} = R_{33e} = 0,526$. Pour réaliser ces conditions d'optique, il faut modifier la longueur des bras d'entrée et de sortie du déflecteur ($L_{en} = 0,951$ m et $L_{so} = 0,263$ m). La figure (fig. 5. 2) montre les courbes de l'enveloppe du faisceau dans la section I.

- 0,52603	- 0,00005	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
- 1,99979	- 1,90119	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	- 0,00002	- 0,52603	- 0,00005	0,00000	- 7,62977
0,00000	0,00000	- 1,90119	- 1,90119	0,00000	- 9,99962
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000	1,21180
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000

Table. 5.1

6 Accélération et focalisation du faisceau

Les particules d'ADN sont extraites de la source (non représentée sur le dessin) au moyen d'une électro-vanne capillaire. Un régime pulsé ou continu peut être choisi. Ensuite 4 filaments chauffés répartis autour du faisceau d'ADN produisent un faisceau d'électrons qui ionise ces particules partiellement dans le volume (1), (voir dessin 1), où un pompage à vide crée une pression faible. Un cône percé limite la pénétration des particules neutres dans la région d'accélération suivante. L'isolation électrique [Ref. 6] est dimensionnée afin de pouvoir appliquer une tension maximale d'accélération $T_{acc} = 30$ kV. La partie centrale, avec 3 électrodes, forme une lentille électrique de focalisation [Ref. 7]. L'électrode du milieu peut être portée à une tension $T_e = 40$ kV, les deux autres électrodes étant mises à la masse.

Cette lentille joue un double rôle :

- 1- elle crée par sa focalisation un point objet repris par l'étage suivant de la déviation électrique,
- 2- elle assure un vide différentiel grâce à un diaphragme de sortie.

7 Spectromètre complet

Dans le spectromètre complet : l'analyse en énergie est faite grâce au déflecteur électrique sphérique dans la section I, le changement de direction de la dispersion en énergie est réalisé dans la section II et l'analyse en masses dans la section III. Sur la figure (7. 1) est représentée la ligne du faisceau en entier. Le programme TRAGRA trace la trajectoire de dispersion dans le plan X. Le programme TRANSPORT ne permet pas le mélange de la dispersion de l'énergie et de la dispersion du moment cinétique.

Pour des raisons d'illustration, nous avons inversé la polarité des quadrupôles de la section II et la polarité de l'aimant de la section III (fig. 7. 2). Nous présentons la solution choisie pour la ligne complète. Nous donnons dans la table (Tab. 7. 1) la matrice de transformation de cette ligne.

0,00000	0,00000	-0,52653	0,00003	0,00000	15,26693
0,00000	0,00000	-5,31764	-1,89919	0,00000	14,92533
-0,53616	-0,00448	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
-4,78027	-1,90506	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	-0,73325	-0,28995	1,00000	4,94911
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000

Table. 7. 1

Le terme R_{16} de la matrice est la dispersion de la rigidité du faisceau [Ref. 8]

$$D = R_{16} = 15,27 \text{ mm} / \% \quad (3)$$

Pour la séparation des 2 masses 100 et 101 uma par exemple, la distance L des 2 pics sera

$$L = \frac{1}{2} D = 7,63 \text{ mm} \quad (4)$$

Le pouvoir de résolution d'un spectromètre à double focalisation s'obtient par la formule suivante [Ref. 9]

$$\frac{M}{m} = \frac{1}{2} \frac{r_m (1 + |G|)}{S |G| + C} \quad (5)$$

où

r_m est le rayon de l'aimant, $G = G_e G_m$ le grandissement total de la partie électrique et magnétique du spectromètre, S la largeur de la fente objet d'entrée et C la largeur de la fente image finale.

Notre aimant a un rayon $r_m = 374 \text{ mm}$ et le grandissement total est $G = -0,527$. Pour des largeurs de fentes $S = C = 1 \text{ mm}$, la valeur calculée pour le pouvoir de résolution sera

$$\frac{M}{m} = 187 \quad (6)$$

Sur la figure (fig. 7. 3) la longueur de la ligne est déroulée avec ses éléments dessinés à l'échelle. Sur la partie supérieure sont indiquées les cotes physiques telles qu'il faut les donner comme entrées du programme TRANSPORT. Sur la partie inférieure sont indiquées les cotes mécaniques nécessaires à l'installation de la ligne. Dans la table (Tab. 7. 2) nous donnons pour indication la liste des données d'entrée du programme TRANSPORT.

Les 7 quadrupôles prévus sont du même type que ceux utilisés au Dôme de l'IPN. Nous espérons les récupérer sur l'ancienne installation. Nous présentons dans la table (Tab. 7. 3),

pour une énergie du faisceau de 30 keV, les valeurs des tensions électriques sur les quadrupôles et les électrodes du déviateur, résultats d'un calcul avec le programme TRANS [Ref. 10].

$T_{acc} = 30,0 \text{ kV}$	
1qx1	$U_{qua} = -625,1 \text{ V}$
5qx1	
2qy1	$U_{qua} = 584,9 \text{ V}$
4qy1	
3qx1	$U_{qua} = -772,1 \text{ V}$
1qy2	$U_{qua} = -115,3 \text{ V}$
2qy2	
défecteur	$U_{déf} = \pm 2400 \text{ V}$

Table 7. 3 Tensions sur les électrodes des quadrupôles et du défecteur électrique, référencées par rapport au potentiel de la masse. Étant proportionnelles à la tension d'accélération, une division de cette tension par deux réduit de moitié les valeurs de ces tensions.

Il est indispensable d'utiliser des fentes réglables : 2 horizontales à l'entrée et à la sortie de la section I, 2 autres verticales à l'entrée et à la sortie de la section III. Pour régler le régime maximum du défecteur, nous plaçons une cage de Faraday amovible à la sortie de la section I après la fente de sélection. De la même façon une autre cage de Faraday à la sortie de la section III permet le contrôle de l'intensité du faisceau transmis par le spectromètre. À l'entrée de la section II sera placé un élément de steering du type Dôme (vertical et horizontal), ainsi qu'un autre à l'entrée de la section III, cela pour corriger les erreurs d'alignement du faisceau. Pour une mise au point de ce faisceau, il est souhaitable de disposer d'éléments de visualisation à la sortie des sections I et III.

Remerciements

Nous remercions pour leur excellente collaboration et leur enthousiasme Mme Bernadette Farizon et M Michel Farizon. Nous remercions également M Jean Martin pour le dessin (1) et pour son étude de l'isolation électrique des différents éléments et des problèmes liés au vide.

Références

1. B. Farizon, M. Farizon, M. J. Gaillard, F. Gobet et Ch. Guillermier, *Étude des Effets des Rayonnements Ionisants à l' Échelle Moléculaire : Impact de Protons et d' Ions Carbone Rapides sur des Agrégats de Molécules d' Intérêt Biologique*, IN2P3-CNRS / Université Claude Bernard Lyon I, 1998
2. K. L. Brown, D. C. Carey, Ch.Iselin and F. Rothacker, CERN 80-04, *Transport a Computer Program for Designing Charged Particle Beam Transport Systems*, 1981
3. G. Hadinger : *Logiciel TRAGRA permettant une sortie graphique des résultats obtenus à partir du programme TRANSPORT modifié*, LYCEEN RT 9813, IN2P3, 1998
4. D. C. Carey, *The Optics of Charged Particles Beams*, Harwood Academic Publishers 1987
5. A. Septier, *Focusing of Charged Particles*, volume II, Academic Press, 1967
6. J. Martin, *Communication privée*, 2000
7. G. Hadinger, A. Gardon, A. Plantier et Y. Champelovier, *Rapport sur l'optique de la voie de faisceau de l'accélérateur 2.5 MeV Van de Graaf*, 1999
8. H. Wollnik, *Optics of Charged Particles*, Academic Press, 1987
9. A. Cornu, *Précis de spectrométrie de masse analytique*, Presses Universitaires de Grenoble, 1981
10. G. Hadinger, Y. Champelovier, A. Plantier et A. Gardon, *Rapport sur l'optique de la voie de faisceau de l'accélérateur 4 MeV Van de Graaf*, 1999

− 1,00011	− 0,00001	0,00000	0,00000	0,00000	15,24431
− 1,95696	− 0,99991	0,00000	0,00000	0,00000	14,91540
0,00000	0,00000	− 1,00007	− 0,00006	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	− 0,90944	− 0,99998	0,00000	0,00000
− 0,14915	− 0,15243	0,00000	0,00000	1,00000	2,35854
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000

0,00000	0,00000	− 1,00002	0,00003	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	− 4,36290	− 0,99984	0,00000	0,00000
− 1,00002	0,00003	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
− 4,36290	− 0,99984	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000	1,37758
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000

0,00000	0,00000	1,00002	− 0,00003	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	4,36290	0,99984	0,00000	0,00000
1,00002	− 0,00003	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
4,36290	0,99984	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000	1,37758
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000

− 0,52603	− 0,00005	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
− 1,99979	− 1,90119	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	− 0,00002	− 0,52603	− 0,00005	0,00000	− 7,62977
0,00000	0,00000	− 1,90119	− 1,90119	0,00000	− 9,99962
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000	1,21180
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000

0,00000	0,00000	− 0,52653	0,00003	0,00000	15,26693
0,00000	0,00000	− 5,31764	− 1,89919	0,00000	14,92533
− 0,53616	− 0,00448	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
− 4,78027	− 1,90506	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	− 0,73325	− 0,28995	1,00000	4,94911
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000

– 1,00017	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	20,64426
– 2,85202	– 0,99983	0,00000	0,00000	0,00000	29,43649
0,00000	0,00000	– 0,99952	– 0,00024	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	2,65909	– 0,99983	0,00000	0,00000
– 0,29436	– 0,20641	0,00000	0,00000	1,00000	1,94524
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000

0,00000	0,00000	– 1,00002	0,00003	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	– 4,36290	– 0,99984	0,00000	0,00000
– 1,00002	0,00003	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
– 4,36290	– 0,99984	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000	1,37758
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000

0,00000	0,00000	1,00002	– 0,00003	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	4,36290	0,99984	0,00000	0,00000
1,00002	– 0,00003	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
4,36290	0,99984	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000	1,37758
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000

– 1,06497	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
– 1,99979	– 0,93899	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	– 1,06497	0,00000	0,00000	– 10,32463
0,00000	0,00000	– 1,99979	– 0,93899	0,00000	– 9,99962
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000	1,00048
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000

0,00000	0,00000	– 1,06520	0,00003	0,00000	20,64334
0,00000	0,00000	– 9,68308	– 0,93878	0,00000	29,43649
– 1,06631	– 0,00023	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
– 3,81194	– 0,93862	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
0,00000	0,00000	– 1,68535	– 0,19380	1,00000	4,32334
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,00000

dessin 1 Ensemble schématique de l'ionisation, de l'accélération et de la focalisation du faisceau d'ADN. En (1) ionisation des particules avec les 4 filaments chauffés (2). En (3) limitation des particules neutres par un cône percé. En (4) électrode d'extraction et d'accélération. En (5) électrode centrale mise à une tension T_e . En (6) 2 électrodes mises à la masse. En (7) diaphragme dans la partie basse assurant un bon vide au niveau de l'entrée de l'étage suivant de déflexion électrique.

figure 3. 1 Courbes des enveloppes du faisceau dans la section III pour un faisceau initial de demi-largeur $X = 0,1$ mm et de demi-angle $X' = 15,0$ mrad. La demi-extension en X est représentée dans la partie supérieure, celle en Y dans la partie inférieure. Les quadrupôles ($1qy2$) et ($2qy2$) sont dessinés à l'échelle de même que l'aimant coupé en deux pour des contraintes de calcul.

figure 4. 1 Illustration géométrique du fonctionnement de la section II. Au début de la section, une flèche pointée sur l'axe Y vers les valeurs positives — symbolisant une direction — se retrouve, après transformation, sur l'axe des X pointée vers les valeurs négatives. Le changement de la polarité des 5 quadrupôles ferait pointer cette flèche vers les valeurs positives (en pointillé).

figure 4. 2 Demi-enveloppes du faisceau dans la section II en X et Y. Le premier quadrupôle est focalisant en X et défocalisant en Y. Les actions focalisante et défocalisante sont inversées successivement à chaque quadrupôle.

figure 4. 3 Figure identique à la figure (4. 2) sauf l'inversion de la polarité des 5 quadrupôles.

figure 5. 1 Demi-enveloppes du faisceau dans la section I. Le déflecteur est introduit sous forme d'une matrice de transfert dans le programme TRANSPORT qui, de ce fait, ne peut pas

afficher une longueur physique. Seules les longueur d'entrée et de sortie $L_{\text{en}} = L_{\text{so}} = 0,500$ m sont représentées. La longueur réroulée du déflecteur est $L_e = 0,785$ m.

figure 5. 2 Exemple similaire à celui de la figure (5. 1) sauf les valeurs d'entrée $L_{\text{en}} = 0,951$ m et de sortie $L_{\text{so}} = 0,0263$ m. Cet exemple est retenu comme solution définitive.

figure 7. 1 Ligne du faisceau en entier. Analyse en énergie grâce au déflecteur électrique sphérique (section I). Changement de direction de la dispersion en énergie (section II). Analyse du faisceau en masses (section III).

figure 7. 2 Figure identique à la figure (7. 1) sauf la direction de la déviation de l'aimant qui est changée (section III), entraînant une inversion de la polarité des quadripôles de la section II.

figure 7. 3 Ligne déroulée avec ses éléments à l'échelle, avec les cotes physiques telles qu'il faut les donner comme entrées du programme TRANSPORT (partie supérieure), et avec les cotes mécaniques nécessaires au montage de la ligne (partie inférieure).

figure 7. 4 Dessin schématique du montage complet (cotes hors-tout indiquées).

Table 7.2 Liste des données d'entrée du programme TRANSPORT pour l'exemple retenu.

1 2 3 4 5 6 7

1 2 3 4 5 6 7

1 2 3 4 5 6 7

1 2 3 4 5 6 7

1 2 3 4 5 6 7

1 2 3 4 5 6 7